

УДК 551.510.413.5+550.837.61+551.501.8

ФОРМА ДОПЛЕРОВСКИХ СПЕКТРОВ СИГНАЛА МОЩНОЙ РАДИОВОЛНЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА ТРАССЕ ВАСИЛЬСУРСК – КАЗАНЬ

*А.М. Дрешер, В.В. Бочкарёв, Р.Р. Латыпов,
И.Р. Петрова, В.Л. Фролов*

Аннотация

В работе представлены результаты первых экспериментов по измерению спектров рассеянных сигналов искусственными ионосферными неоднородностями, возбуждаемыми в ионосфере Земли мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура», с использованием приёмной аппаратуры доплеровского комплекса «Спектр» Казанского (Приволжского) федерального университета.

Ключевые слова: искусственные ионосферные неоднородности, доплеровский спектр, спектр рассеянного сигнала.

Введение

Хорошо известно, что прохождение радиоволн через среду со случайными неоднородностями изменяет спектральные характеристики принимаемых сигналов. Это вносит искажения в передаваемую с помощью этих радиоволн информацию, однако изучение этих искажений даёт важные сведения о статистических характеристиках среды распространения. В настоящей работе представлены результаты первых наших экспериментов по регистрации как прошедших через возмущённую область ионосферы сигналов вещательных радиостанций (в нашем случае принималось излучение московской станции точного времени на частоте 4996 кГц), так и сигналов собственно мощной радиоволны, используемой для нагрева ионосферы (так называемый метод саморассеяния, когда волна накачки (ВН) создаёт искусственные ионосферные неоднородности и сама же на них рассеивается [1]). Возбуждение искусственных ионосферных неоднородностей осуществлялось с помощью нагревного стенда «Сура», расположенного в 100 км к востоку от г. Нижний Новгород (координаты стенда: $\phi = 56.154^\circ$ с.ш., $\lambda = 46.1^\circ$ в.д.). Приёмная аппаратура размещалась на территории Казанского (Приволжского) федерального университета, приблизительно в 170 км к востоку от стенда «Сура».

Эксперимент, результаты которого рассматриваются в настоящем сообщении, был проведён с 23 по 26 августа 2010 г. Нагревный стенд работал в двух режимах: излучение мощной радиоволны на одной частоте и излучение на различных частотах, выбираемых таким образом, чтобы в каждом цикле их изменения значение $f_{ВН}$ проходило через частоту четвёртой гармоники гирочастоты электронов. С 23 по 25 августа с 16:00 до 18:30 мск использовался одинаковый режим работы передатчиков: излучались радиоволны О-поляризации на частоте 4785 кГц с эффективной мощностью $P_e = 75$ МВт; излучение ВН в режиме «несущая» длилось 3 мин, затем делалась 7-минутная пауза, причем в 7-минутную паузу продолжали излучаться короткие 15-секундные импульсы с периодом повторения 1 мин, после этого цикл повторялся.

26 августа с 16:00 до 17:36 мск нагревный стенд «Сура» излучал мощные радиоволны O -поляризации последовательно на частотах 5425, 5445, 5465 и 5485 кГц. На каждой частоте излучение продолжалось 90 с, после чего за паузу воздействия в 30 с устанавливался следующий номинал частоты ВН. После достижения наибольшего своего значения частота ВН с тем же шагом уменьшалась до наименьшей частоты, затем опять увеличивалась до наибольшей и т. д. Диапазон частот ВН был выбран таким образом, чтобы в каждом цикле их изменения значение $f_{\text{ВН}}$ проходило через частоту четвертой гармоники гирочастоты электронов, которая во время эксперимента уменьшалась в среднем от 5465 до 5425 кГц. Регистрация сигнала ВН выполнялась только на частоте 5425 кГц. При этом величина отстройки частоты ВН от гирогармоники $\delta f = f_{\text{ВН}} - 4f_{\text{се}}$ изменялась в пределах от -20 до 0 кГц. Несмотря на то что не было проведено измерений по взаимодействию мощной радиоволны с плазмой $F2$ -области ионосферы с положительными отстройками частоты ВН от гирогармоники, удалось получить некоторые результаты, о которых речь пойдет ниже.

1. Характеристики приёмной аппаратуры и методика обработки экспериментальных данных

Приемная аппаратура состояла из доплеровского фазоугломерного комплекса «Спектр» [2, 3]. В состав комплекса входят 4 связанных КВ-приемника РЗЗ9 (диапазон $1 \div 30$ МГц). На двух приемниках были установлены частоты радиостанции точного времени РВМ 4996 и 9996 кГц. Частота третьего приемника устанавливалась равной частоте ВН в соответствии с программой работы нагревного стенда. Использовался метод цифрового приема с аналоговым квадратурным разложением сигнала на низкой частоте, позволяющий определять фазовые и амплитудные характеристики при цифровой спектральной обработке в динамическом диапазоне до 70 дБ. Стабильность частотных параметров определяется стандартом частоты FS-725 и составляет 10–11 Гц (меньше 0.001 Гц на частоте 10 МГц). Сигнал с приемников записывался с частотой дискретизации 100 Гц. Для выделения особенностей изменения спектра сигнала ВН строилась спектрограмма всего дня наблюдения с различными окнами, от 20 до 60 с, и перекрытием 5 с. Далее выделялись моменты времени, в которых спектр имел какие-либо особенности.

2. Результаты измерений

На рис. 1 показаны три спектра принятого сигнала на частоте ВН $f_0 = 5425$ кГц для трёх сеансов нагрева с началом: в 16:30 мск, когда величина расстройки δf была равна -10 кГц, в 17:06, когда $\delta f = 0$, и в 17:18, когда $\delta f = -20$ кГц. Когда начинается сеанс нагрева, в ионосферной плазме происходят процессы, вызывающие изменение спектра принимаемой радиоволны. Приводимые далее спектры были построены для интервала времени, близкого к окончанию каждого из циклов нагрева, когда они уже приобретали стационарный вид. Для $\delta f = 0$ помимо центрального максимума на частоте $F \approx 1.6$ Гц, отвечающего отражённой от ионосферы нерассеянной компоненте сигнала, наблюдаются ещё два более широких боковых максимума с доплеровским смещением частоты ~ 0.4 Гц относительно частоты центрального максимума и на ~ 15 дБ более слабые по своей спектральной интенсивности. Для $\delta f = -10$ кГц частота центрального максимума была ~ 1.9 Гц. Здесь выделяющейся структурой является широкий максимум в диапазоне $F \approx 2.3 \div 3.1$ Гц, максимальная спектральная интенсивность которого на ~ 18 дБ меньше спектральной интенсивности центрального максимума. Возможно, в спектре также присутствует слабый максимум со сдвигом около -0.5 Гц относительно частоты центрального, ослабленный на ~ 20 дБ. Для $\delta f = -20$ кГц частота

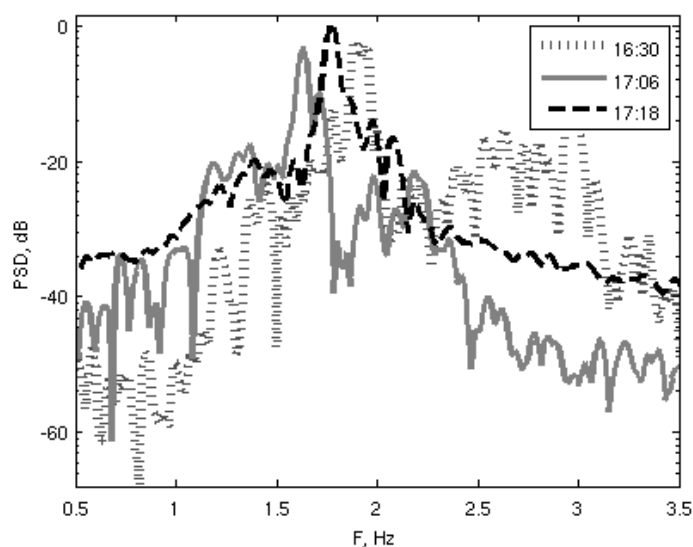


Рис. 1. Спектры сигнала ВЧ для трех сеансов нагрева 26 августа 2010 г. Точками показан спектр сигнала, полученного в 16:30 мск, сплошной линией показан спектр сигнала, полученного в 17:06 мск и пунктиром показан спектр сигнала, полученного в 17:18 мск

центрального максимума была ~ 1.8 Гц. Спектр здесь наиболее узкий с максимумом на отстройке ~ 0.4 Гц относительно центрального, его ослабление составляет ~ 24 дБ. Таким образом, приведённые данные показывают существование сильной зависимости спектра принимаемого сигнала от величины отстройки частоты ВЧ от частоты гирогармоники, что соответствует изменению условий взаимодействия мощной радиоволны с плазмой $F2$ -слоя ионосферы.

Выполненные измерения позволили установить, что в первые 10–20 с после начала модификации ионосферной плазмы наблюдаются более широкие спектры принимаемых сигналов за счёт более интенсивных спектральных составляющих на частотах меньших частоты нерассеянной компоненты; обужение спектра происходит приблизительно за 1 мин.

Для иллюстрации этого на рис. 2 приведены спектры сигнала ВЧ, один из которых соответствует началу сеанса нагрева, а второй – окончанию. Можно видеть, что за данный интервал времени (1 мин) уровень боковых составляющих спектра значительно снизился.

Отмеченная выше особенность спектра принимаемого сигнала ВЧ была подтверждена измерениями на частоте 4996 кГц. На рис. 3 приведены спектры сигнала для двух сеансов нагрева с началом в 16:30, когда величина расстройки δf была равна -10 кГц, и в 17:06, когда $\delta f = 0$.

Хорошо видно, что, как и для представленных на рис. 1 данных, спектр для $\delta f = -10$ кГц показывает сильное уширение в сторону больших частот F , отражая изменение условий взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой в области гирогармонического резонанса.

Отметим также, что в более поздние часы наблюдений, чем рассматривавшиеся выше, на интервале времени 18:00–20:00 мск с переходом к ночным условиям наблюдалось постепенное уширение спектра регистрируемого сигнала, как это ранее было найдено [4], где данный эффект связывался с усилением турбулизации ионосферной плазмы в условиях неосвещённой ионосферы.

С 23 по 25 августа использовался другой режим работы нагревного стенда «Сура», а именно непрерывное излучение импульсов в течение 2.5 ч на одной

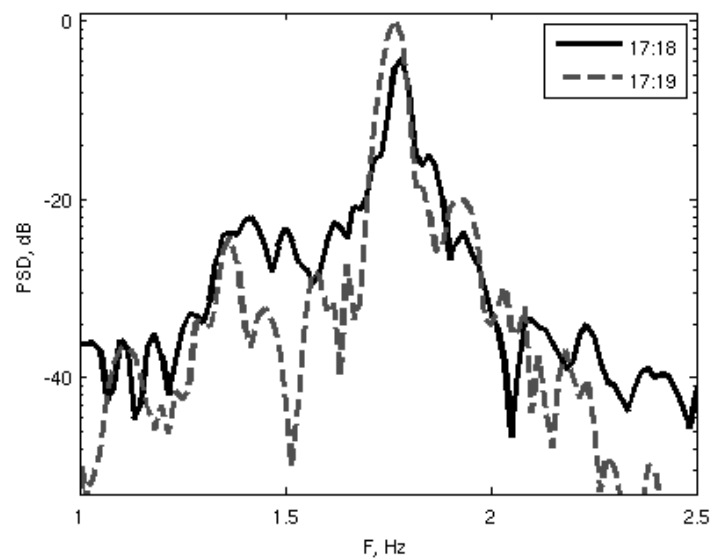


Рис. 2. Спектры сигнала ВН в начале сеанса нагрева 17:18 мск и во время окончания сеанса

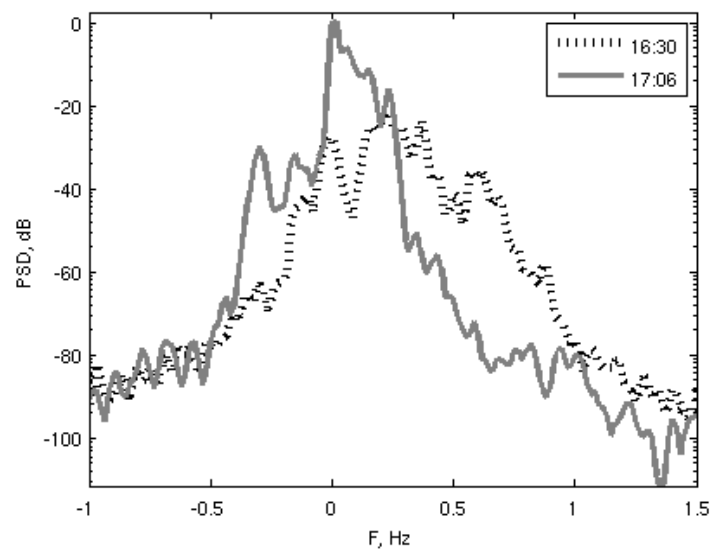


Рис. 3. Спектры радиостанции точного времени РВМ (4996 кГц) для двух сеансов нагрева 26 августа 2010 г. Точками показан спектр сигнала, полученного в 16:30 мск, сплошной линией – спектр сигнала, полученного в 17:06 мск

частоте. Спектрограмма сигнала ВН для сеанса 23 августа 2010 г. представлена на рис. 4. Видно, что доплеровский сдвиг частоты сигнала ВН испытывает квазипериодические вариации с амплитудой ~ 0.5 Гц. Характерные временные масштабы доплеровских вариаций – от 5 до 30 мин. Подобное поведение принимаемого сигнала может определяться возбуждением (усилением) внутренних гравитационных волн при периодическом нагреве ионосферы мощным коротковолновым излучением, как это отмечалось, например, в [5, 6].

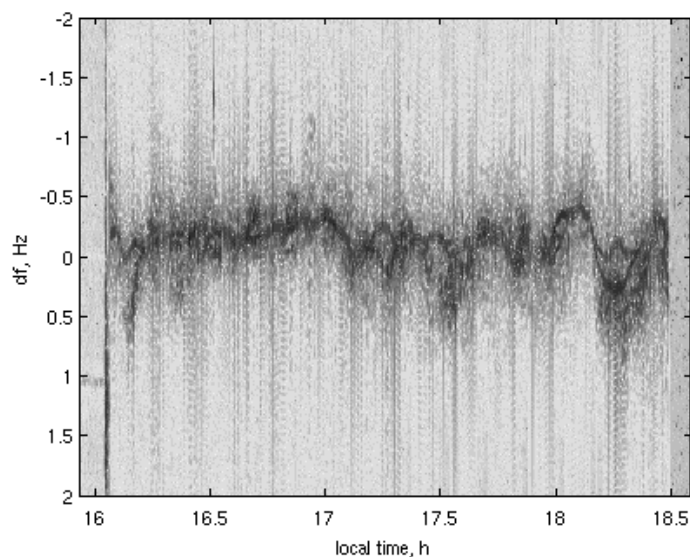


Рис. 4. Спектрограмма сигнала ВН 12 августа 2010 г.

Заключение

Выполненные исследования продемонстрировали зависимость формы спектра принимаемого сигнала от величины отстройки частоты ВН от частоты гирогармоники в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Привлекательность подобного рода исследований состоит в том, что в условиях гирогармонического резонанса небольшие изменения частоты ВН вблизи гармоники частоты электронов в области взаимодействия ВН с плазмой приводят к сильным изменениям свойств искусственной ионосферной турбулентности, как это видно, например, по измерениям характеристик искусственного радиоизлучения [7]. Выполненные измерения могут свидетельствовать о значительном изменении характера движений искусственных ионосферных неоднородностей в возмущённой области ионосферы, индуцированных при её нагреве мощным коротковолновым радиоизлучением. В развитие начатых экспериментов необходимо, в первую очередь, выполнить исследования во всём интервале δf от -200 до $+200$ кГц относительно частоты гирогармоники.

Интересным с точки зрения развития начатых исследований представляется продолжение экспериментов по измерению квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты радиосигналов, прошедших возмущённую область ионосферы, поскольку они несут информацию о возбуждении (усилении) внутренних гравитационных волн при периодическом нагреве ионосферы мощными КВ-радиоволнами. Это новое направление в нагревных экспериментах, которое интенсивно развивается в последнее время.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-02-00374).

Summary

A.M. Dresher, V.V. Bochkarev, R.R. Latypov, I.R. Petrova, V.L. Frolov. The Form of Doppler Spectra of a Strong Radio Wave Signal According to Measurements on the Route from Vasilursk to Kazan.

In this work, we demonstrate first results obtained in measurements of spectral characteristics of signals scattered from artificial ionospheric irregularities excited in the Earth's

ionosphere by powerful HF waves radiated by the Sura heating facility. The receiving equipment elaborated in Kazan Federal University was used in these measurements.

Key words: artificial ionospheric irregularities, Doppler spectrum, scattered signal spectrum.

Литература

1. Kagan L.M., Nicolls M.J., Kelley M.C., Frolov V.L., Belikovich V.V., Bakhmet'eva N.V., Komrakov G.P., Nedzvetski D.I., Uryadov V.P., Yampolski Yu.M., Koloskov A.V., Zalizovski A.V., Galushko V.L., Kasheev S.B., Blagoveshenskaya N.F., Kornienko V.A., Borisova T.D., Gurevich A.V., Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Trondsen T.S., Donovan E. Optical and RF diagnostics of the ionosphere over the Sura facility: Review of Results // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – Т. 11, № 3. – С. 221–242.
2. Petrova I.R., Bochkarev V.V., Latipov R.R. Application of HF Doppler measurements for the investigation of internal atmospheric waves in the ionosphere // Adv. Space Res. – 2009. – V. 44, No 6. – P. 685–692.
3. Petrova I.R., Bochkarev V.V., Teplov V.Yu., Sherstyukov O.N. The daily variations of Doppler frequency shift of ionospheric signal on middle-latitude radio lines // Adv. Space Res. – 2007. – V. 40, No 6. – P. 825–834.
4. Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Комраков Г.П., Черкашин Ю.Н., Васюков В.В. Ракурсное рассеяние коротких радиоволн в условиях воздействия на ионосферу мощным наклонным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 8. – С. 669–677.
5. Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю.А. и др. Возбуждение внутренних гравитационных волн в верхней атмосфере с помощью стенда «Сура» // Тез. докл. XIX Всерос. конф. по распространению радиоволн. – Казань, 1999. – С. 369.
6. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Пушин В.Ф. Вариации спектра ионосферных волновых возмущений при периодическом нагреве плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. – 2011. – Т. 54, № 2. – С. 81–96.
7. Frolov V.L., Sergeev E.N., Ermakova E.N., Komrakov G.P., Stubbe P. Spectral features of stimulated electromagnetic emissions, measured in the 4.3–9.5 MHz pump wave frequency range // Geophys. Res. Lett. – 2001. – V. 28, No 16. – P. 3103–3106.

Поступила в редакцию
10.10.11

Дрешер Александр Михайлович – ассистент кафедры радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: aleksandr_inbox.ru

Бочкарев Владимир Владимирович – ассистент кафедры радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

Латыпов Руслан Рустемович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

Петрова Инна Романовна – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

Фролов Владимир Леонтьевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского радиофизического института, г. Нижний Новгород.